

氏 名	河 合 宏 之
生 年 月 日	
本 籍	愛知県
学 位 の 種 類	博士（工学）
学 位 記 番 号	博甲第 614 号
学位授与の日付	平成 16 年 3 月 25 日
学位授与の要件	課程博士（学位規則第 4 条第 1 項）
学位授与の題目	受動性に基づくロボットの 3 次元動的視覚フィードバック制御
論文審査委員(主査)	藤田 政之（工学部・教授）
論文審査委員(副査)	山田 外史（自然応用計測研究センター・教授）岩原 正吉（工学部・教授） 藤原 直史（工学部・教授）神谷 好承（自然科学研究科・教授）

学 位 論 文 要 旨

受動性に基づくロボットの 3 次元動的視覚フィードバック制御

Passivity-based 3-D Dynamic Visual Feedback Control for Robotic Systems

This paper investigates the visual feedback control based on the passivity for target tracking problems in the three-dimensional workspace. Firstly we derive a model of the relative rigid body motion between the camera and the moving target object using the homogeneous representation and the adjoint transformation. However, the relative rigid body motion can not be measured directly in visual feedback systems. Hence, we propose a nonlinear observer which will estimate the relative rigid body motion from image information. Secondly we derive the passivity of the dynamic visual feedback system by combining the manipulator dynamics and the visual feedback system. We propose a dynamic visual feedback control law which guarantees local asymptotic stability of the overall closed-loop system using a Lyapunov function. L_2 -gain performance analysis for the proposed control law is discussed using the storage function. Finally experiment results confirm the effectiveness of the dynamic visual feedback control law. The main contribution of this paper is to derive that the dynamic visual feedback system preserves the passivity of the visual feedback system.

1 はじめに

本研究では、ロボットマニピュレータの手先にカメラを取り付けた Eye-in-Hand 構造の視覚フィードバックシステムにおける、3 次元空間での相対位置姿勢制御問題を考える（図 1 参照）。特に、静止した観測対象に対する位置決め制御の安定性解析と、観測対象の未知な運動に対する追従問題の制御性能解析について議論する。これらは、従来研究では議論されていない問題である。その理由として“3 次元における相対位置姿勢の推定問題とロボットの制御問題をひとつの枠組みで捉えることが困難である”ことや“安定性や制御性能解析のためには、位置のみだけでなく姿勢もシステムの状態とみなす必要がある”などが挙げられる。

本研究では、位置と姿勢を考慮するために、同次表現と随伴写像を用いて視覚フィードバックシステムを表現する。そして、制御理論的アプローチにより推定

問題とロボットの制御問題をひとつの枠組みで捉えることを考える。また、実機により提案する制御則の安定性と制御性能解析についての有効性を検証する。

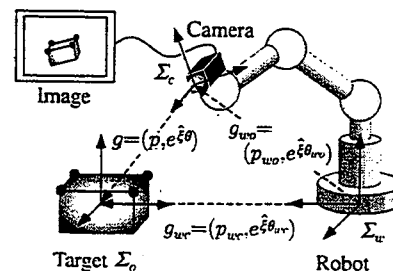


図 1: Visual feedback system

2 剛体運動の視覚フィードバック制御

相対位置姿勢の推定問題を考えるために、マニピュレータダイナミクスが無視できるとの仮定のもと、剛体運動の視覚フィードバック制御を考える。まず、基

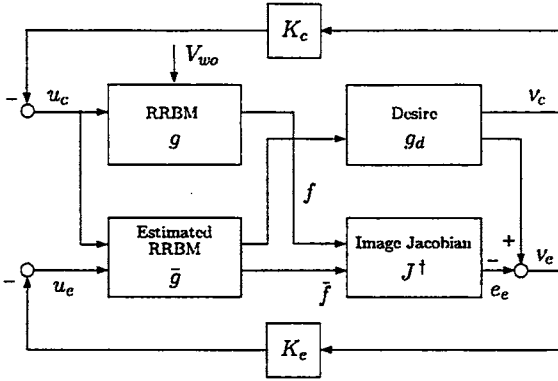


図 2: Block diagram of visual feedback system

準座標系 Σ_w , カメラ座標系 Σ_c および観測対象座標系 Σ_o の 3 つの座標系から剛体運動モデルを導出した。その際、状態として位置 $p \in \mathcal{R}^3$ だけでなく姿勢 $e^{\hat{\theta}\xi} \in SO(3)$ を考慮するために、同次表現 $g \in SE(3)$ とその速度表現を表すための随伴写像 $Ad_{(g)} \in \mathcal{R}^{6 \times 6}$ を用いて表現した。

視覚フィードバックシステムで得られるのはカメラからの視覚情報 f であるので、この剛体運動モデルで表される相対位置姿勢 g は直接えられない。そこで、相対位置姿勢の推定値 \bar{g} を得るための推定問題を考え、剛体運動モデルの構造を模擬したオブザーバを構成した。このとき、透視変換を介して得られる視覚情報とオブザーバで構成される推定偏差モデルにおいて、受動性が成り立つことを示した。この推定偏差モデルにおける受動性を示したことが大きな貢献であるといえる。そして、制御偏差モデルと併せることで構成される視覚フィードバックシステムを構成した。

このシステムの入力を $u_{ce} = [u_c^T u_e^T]^T$, 出力を $v_{ce} = [v_c^T v_e^T]^T$ とするとき、この入出力間に受動性 $\int_0^T u_{ce}^T v_{ce} \geq -\beta_{ce}$ が成立することを示した。図 2 に示すように、受動性に基づいた制御則 $u_{ce} = -K_{ce}v_{ce}$, $K_{ce} = \text{diag}\{K_c, K_e\}$ を提案した。この制御則を用いた閉ループ系の平衡点は漸近安定である。また、観測対象の運動 V_{wo} を外乱と捉えることで追従問題における性能が、 L_2 ゲイン制御性能解析によって得られることを示した。

3 ロボットの動的視覚フィードバック制御

視覚フィードバックシステムとマニピュレータダイナミクスを結合することで構成した動的視覚フィードバックシステムが受動性を有することを示す。このことは、剛体運動モデルにおける相対位置姿勢の推定問題を、制御理論的枠組みで統一的に定式化したことを利用している。

二つの受動システムは、カメラ速度 $u_c (= V_{wc})$ とマ

ニピュレータの関節角速度 \dot{q} の関係式 $V_{wc} = J_b(q)\dot{q}$ によって結び付けられる (図 3)。このとき、動的視覚フィードバックシステムの入力を $u = [u_\xi^T u_d^T u_e^T]^T$, 出力を $v = [\xi^T v_c^T v_e^T]^T$ とするとき、この入出力間に $\int_0^T u^T v \geq -\beta$ が成立する。これは、動的視覚フィードバックシステムが受動性を有していることを示している。

さらに、動的視覚フィードバックシステムにおいて関節角速度を推定するオブザーバ型の制御則を提案した。この制御則は、ロボット制御における受動性に基づく制御のひとつを自然に拡張した構造となっている。入力として $u = -Kv$, $K = \text{diag}\{K_\xi, K_c, K_e\}$ を提案し、安定性と L_2 ゲイン制御性能解析を示した。動的視覚フィードバックシステムを推定法における性質を保存したうえで、二つの受動システムを結合することで構成したことが本研究における重要な成果のひとつとして挙げられる。

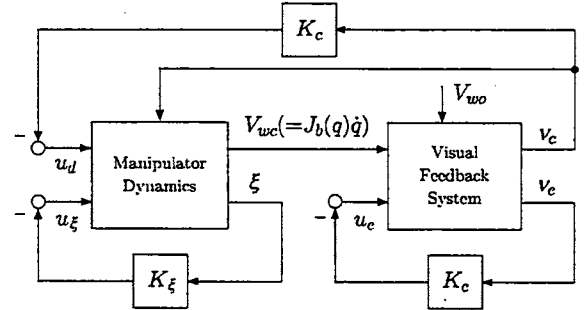


図 3: Block diagram of dynamic visual feedback system

4 実験検証

平面 2 自由度マニピュレータを用いて動的視覚フィードバックシステムを構成し、提案する動的視覚フィードバック制御則を実装した (図 4)。図 5 に 2 通りのゲインにおける偏差のノルムを示す (上図 $\gamma = 0.62$, 下図 $\gamma = 0.23$)。観測対象を $0 \leq t \leq 9.6$ の間、運動させた。図 5 において、観測対象が静止した後 (9.6 秒後) には偏差が 0 に漸近していることから、提案する制御則の漸近安定性が示される。一方、 L_2 ゲインを表す γ が小さい方が偏差が小さいことから、 γ が外乱抑制レベルを表す指標となっていることが示された。

図 6 に追従問題が考慮されていない画像ベースによる従来法との比較を示す。図 6 は 3 次元空間中での z 軸まわりの回転を表しており、左図が従来法、右図が提案する制御則で、破線が観測対象の運動を示している。画像ベース法における制御則に比べると、3 次元空間中での軌道が観測対象の運動に追従できていることが確認される。

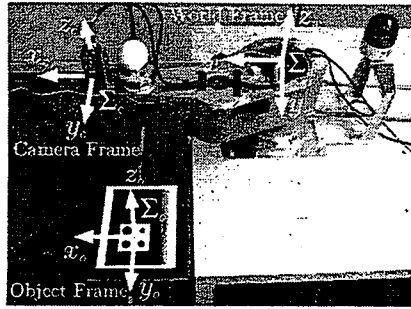


図 4: Coordinate frame on SICE Direct Drive Arm

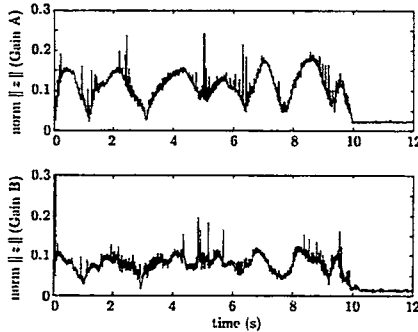


図 5: Euclid norm of controlled output (top: In case of $\gamma = 0.62$, bottom: In case of $\gamma = 0.23$)

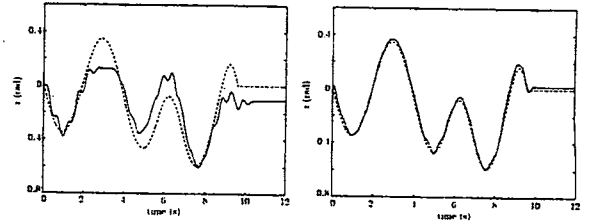


図 6: Rotation of Z axis in 3-D workspace (solid in left: Image-based Method, solid in right: Proposed Method, dashed: Target object)

5 おわりに

本研究では、相対位置姿勢の推定問題とロボットの制御問題をひとつの枠組みで捉えることで、3次元での動的視覚フィードバック制御について議論した。受動性に基づくことで静止した観測対象に対する位置決め制御の安定性と、観測対象の未知な運動に対する追従問題の制御性能解析を示した。

学位論文審査結果の要旨

平成 16 年 2 月 2 日に第 1 回学位論文審査委員会を開催し、提出された学位論文および関係資料について検討を加え、同 2 月 4 日の口頭発表後、第 2 回学位論文審査委員会において協議の結果、以下の通り判定した。

視覚フィードバック制御では、システムをより高性能化するため、制御とロボットと視覚の 3 つを融合し、新たな枠組みで考察することが重要視されてきている。これに対して、本論文では視覚情報による相対位置姿勢の推定問題とロボットの制御問題をひとつの枠組みとして捉えることで、3次元の動的視覚フィードバック制御について議論している。具体的には、推定問題を考えるために、3つの座標系から剛体運動モデルを導出し、そのモデルの構造を模擬したオブザーバを構成している。得られたモデルをもとに視覚フィードバックシステムを構成し、システムが受動性を有することを示している。つぎに、視覚フィードバックシステムとマニピュレータダイナミクスを、各々の受動性を保存したまま結合することで動的視覚フィードバックシステムを構成している。そして、受動性に基づいた制御則を提案し、安定性と制御性能解析をおこない、実機により有効性を検証している。

本研究の成果は、3次元空間における動的な視覚フィードバック制御に関して、受動性の概念から深い考察を与えており、極めて価値のあるものである。

以上の内容を総合して、本論文は博士（工学）の学位を受けるに値するものと判定する。